Journal of Agricultural Machinery
Vol. 9, No. 2, Fall - Winter 2019, p. 265-278

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۹، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۸، ص ۲۷۸-۲۶۵

طراحی، ساخت و ارزیابی دو تیغه زیست مقلد برای کاهش انرژی موردنیاز برای برش ساقه گیاهان علوفه‌ای

هادی دهقان حصار[۱]- داود کلانتری[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۰۵

چکیده

در این تحقیق با استفاده از روش زیست مقلد (روش چگونگی انتقال راه‌حل‌های بیولوژیکی به روش مهندسی) دو تیغه جدید به منظور کاهش انرژی مورد نیاز برای برش ساقه گیاهان زراعی طراحی، ساخته و ارزیابی شد. در ساخت این تیغه‌ها از پروفایل هندسی پنجه جلویی آبدزدک و فک ملخ الهام گرفته شد. سپس انرژی مورد نیاز برای برش دو دسته از گیاهان علوفه‌ای (تغذیه‌ای و هرز) با استفاده از تیغه‌های جدید و تیغه‌های مرسوم (صاف و خمیده) مقایسه گردید. گیاهان علوفه‌ای تغذیه‌ای مورد آزمون شامل یونجه و شبدر و گیاهان هرز شامل خرفه، اویار سلام، تاج خروس، سلمک، نی و شالی بود. طبق نتایج تحقیق حاضر، اختلاف معنی‌داری در انرژی برشی تیغه‌های زیست مقلد ساخته شده در تمامی تیمارها نسبت به تیغه‌های مرسوم (صاف و خمیده) مشاهده شد. تیغه زیست مقلد آبدزدک، به‌طور متوسط ۳۹/۱۳ درصد انرژی مورد نیاز برای برش ساقه گیاهان را نسبت به تیغه صاف و ۳۲/۸ درصد نسبت به تیغه خمیده کاهش داد. با توجه به همه جوانب مورد بررسی، تیغه زیست مقلد آبدزدک عملکرد بالاتری نسبت به تیغه زیست مقلد ملخ برای برش گیاهان نشان داد و به‌عنوان نتیجه نهایی برای ساخت تیغه برش توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: انرژی، تیغه دروگر، دست آبدزدک، زیست مقلد، فک ملخ

مقدمه

امروزه درصد بسیار بالایی از انرژی مصرفی دنیا در بخش کشاورزی مکانیزه مورد استفاده قرار می‌گیرد (Mekonnen *et al.*, 2017). در عین حال انرژی مورد نیاز برای برداشت محصول، جزء مهمی از هزینه‌های عملیاتی مزرعه به‌شمار می‌رود. بنابراین مطالعه فرآیند برداشت علوفه برای کاهش مصرف انرژی در زمان برداشت بسیار اهمیت دارد. از میان دستگاه‌های برداشت، دروگرهای استوانه‌ای برای محصولات علوفه‌ای به‌ویژه یونجه و شبدر استفاده می‌شوند. بنابراین، درک صحیح از فرآیند برش برای طراحی بهینه و بهره‌وری این دروگرها مهم می‌باشد. این نکته بسیار مهم است که خواص مکانیکی محصولات علوفه‌ای به‌طور قابل‌توجهی با محصولات ساخت دست بشر متفاوت است (Dowgiallo, 2005). مواد گیاهی، تقریباً ویسکوالاستیک هستند بنابراین دارای هیچ رابطه تعریف شده‌ای بین تنش و کرنش نیستند. همچنین مدول الاستیسیته گیاهان در طول فرآیند تغییر شکل و برش متفاوت است (Persson, 1987; Chancellor, 1987; Womac *et al.*, 2005; Igathinathane *et al.*, 2009 and 2011; Mathanker *et al.*, 2015) از طرف دیگر مواد گیاهی رفتار متفاوتی تحت نیروهای کششی، فشاری و نیز تحت بارگذاری استاتیک و دینامیک از خود نشان می‌دهند (Persson, 1987; Galedar *et al.*, 2008). برش ساقه طی چندین مرحله شکست در بافت ساقه شکل می‌گیرد. نفوذ اولیه چاقو باعث تغییر شکل پلاستیک موضعی همراه با خمش قابل توجه می‌شود و با نفوذ بیشتر چاقو، تغییر شکل و شکست رخ می‌دهد (Persson, 1987). در طی فرآیند برش، ابتدا ساقه گیاه در جلو و دو طرف تیغه تغییر شکل پیدا کرده و فشرده می‌شود. با ادامه حرکت تیغه رشته‌های الیاف ساقه منحرف و در نهایت بر اثر تنش دچار شکست می‌شوند (Srivastava *et al.*, 1993). بررسی منابع نشان می‌دهد که عوامل مختلفی از جمله پارامترهای مربوط به دستگاه (شامل سرعت پیشروی، طول برش، دبی ورودی محصولات) (O'dogherty and Gale, 1991; Kaack and Schwarz, 2001; Taghijarah *et al.*, 2011) پارامترهای مربوط به خواص فیزیکی و مکانیکی محصول (شامل رطوبت ساقه، میزان رسیده بودن گیاه و خصوصیات ویژه بافتی) (Chen *et al.*, 2004; Ince *et al.*, 2005; Azadbakht *et al.*, 2015) و پارامترهای مربوط به تیغه (شامل هندسه تیغه، زاویه برش، طول برش، تیزی تیغه (شعاع لبه تیز)، نوع لبه برش، نوع تیغه) (Sitkei, 1987; Chattopadhyay and Pandey, 1999; Khazaei *et al.*, 2002) در تعیین نیروی برشی و انرژی برشی ساقه گیاهان دخالت دارند. به‌علاوه هنگامی که برهمکنش این عوامل در نظر گرفته شود، پدیده برش ساقه گیاهان پیچیده‌تر نیز می‌گردد (McRandal, 1978; Chen *et al.*, 2004; Maughan *et al.*, 2013; Mathanker *et al.*, 2015). ماگان و همکاران (Maughan

۱ و ۲- به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
(*- نویسنده مسئول: Email: dkalantari2000@yahoo.com)
DOI: 10.22067/jam.v9i2.69843

(et al., 2013) دریافتند که عملکرد محصول مهمترین عامل تأثیرگذار بر مصرف انرژی است و ۴۶ درصد از تغییرات توان در آزمایشات را به خود اختصاص داده است. همچنین کامگار و همکاران (۲۰۱۷) مکانیزم برش به‌کار رفته در ماشین برداشت، ارتفاع برش، سرعت پیشروی و رطوبت دانه را از جمله عوامل تاثیرگذار بر مصرف انرژی در برداشت عدس گزارش کردند.

براساس تحقیقات تجربی، ادوهرتی و گیل[1] (۱۹۹۱) گزارش دادند که سرعت برش حداقلی برای چمن ۳۰-۲۵ متر بر ثانیه می‌باشد. سرعت‌های پایین‌تر از سرعت حداقلی منجر به انحراف زیاد و افزایش ارتفاع کلش می‌شود. در همین حال، بسیاری از مطالعات دیگر در مورد تاثیر زاویه تیغه و سرعت تیغه بر روی انرژی برش انجام شده است (Chen *et al.*, 2004; Maughan *et al.*, 2013; Mathanker *et al.*, 2015). گوپتا و ادوری[2] (۱۹۹۲) دریافتند که سرعت محیطی بهینه یک تیغه برش نیشکر ۱۳/۸ متر برثانیه و زاویه تمایل ۳۵ درجه و زاویه برش ۲۷ درجه برای تیغه می‌باشد.

ایگاتینانس[3] و همکاران (۲۰۱۰) در بررسی برش موازی ساقه ذرت به این نتیجه رسیدند که تنش برشی در ازای افزایش زاویه برش از صفر تا ۹۰ درجه به میزان ۹۰ درصد کاهش می‌یابد. برش موازی در خرد کردن مواد اولیه مورد استفاده در تولید بیوانرژی بسیار مهم است. در تحقیقات مشابه، یو[4] و همکاران (۲۰۰۶) گزارش دادند که خرد کردن با استفاده از تنش برشی به جای تنش کششی به مصرف انرژی کمتری نیاز دارد. نقی‌پور و همکاران (۲۰۱۷) ضخامت برش، جهت برش (طولی، عرضی و مورب) و نوع تیغه برش (لبه صاف، کنگره‌ای و اره‌ای) را از عوامل تاثیرگذار در فرآیند خشک کردن و کیفیت هویج دانستند. مهارلویی و همکاران (۲۰۱۵) خصوصیات کیفیت تغذیه‌ای محصول یونجه را با استفاده از انرژی برشی و فشردگی محصول جهت توسعه یک سامانه مزرعه‌ای پایش عملکرد کمّی بررسی کردند. طبق نتایج ایشان، انرژی برشی ویژه مورد نیاز تیغه شاخص مناسبی جهت تخمین مقدار فیبر خام یونجه می‌باشد. همچنین انرژی فشردگی ویژه تنها در تخمین شاخص ماده خشک مناسب است.

جانسون[5] و همکاران (۲۰۱۲) به منظور بهینه‌سازی فرآیند برش، یک دستگاه برش ضربه‌ای برای محصولات زراعی را توسعه داده و اثر زاویه مورب تیغه، سرعت برش و قطر ساقه را بر روی انرژی برش مورد نیاز گیاه *Miscanthus* مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق مشخص شد که برش مورب با زاویه ۶۰ درجه و سرعت برش ۱۲/۹ متر برثانیه، ترکیب بهینه‌ای برای برش گیاه مورد آزمون می‌باشد. میانگین انرژی ویژه در ترکیب زاویه برش و سرعت برش ذکر شده برابر با ۷۴۱/۹ ژول بر متر به‌دست آمد. نکته قابل توجه این که در سرعت برش ۱۸/۷ متر بر ثانیه، انرژی ویژه برش به‌طور متوسط ۴۲/۶٪ افزایش یافت. در همین راستا قهرایی و همکاران (۲۰۱۱) گزارش دادند که انرژی برش ویژه به‌طور مستقیم با سرعت بارگذاری متناسب است. بر اساس نتایج آن‌ها، برای کاهش انرژی برش در نیشکر، سرعت پایین‌تر تیغه مناسب است.

لی[6] و همکاران (۲۰۱۳) با تقلید از فرم هندسی پنجه‌ی موش کور برای ساخت دیسک کلش برشی توانستند تنش روی تیغه را ۲۲/۶۴٪ نسبت به دیسک مرسوم کاهش دهند. در همین راستا دهقان حصار و کلانتری (۲۰۱۶) نیز با الهام از پنجه موش، دیسک خاک‌ورزی را طراحی کردند که مقدار تنش وارد بر دیسک به‌طور معنی‌داری در مقایسه با دیسک رایج کاهش یافت. در زمینه الهام از طبیعت، موارد دیگری نیز برای کاربری در صنعت مورد بررسی قرار گرفته است. به‌طور نمونه، فیازا[7] و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از بررسی مورفولوژیکی قسمت‌های مختلف بدن ماهی و تعامل آن با جریان آب و بررسی نحوه انتشار انرژی از بدن به سیال، موفق به ساخت نمونه ربات ماهی شدند. در همین راستا مارک ریبرت[8] و همکاران (۲۰۰۸) نیز با الهام گرفتن از مورفولوژی بدن حیواناتی مانند سگ موفق به ساخت رباتی با نام *bigdog* شدند که با وجود وزن سنگینی که دارد می‌تواند با سرعت زیاد مسیرهای مختلفی از قبیل سطوح با شیب زیاد، زمین‌های برفی و سنگی را طی کند.

با توجه به اهمیت کاهش و بهینه‌سازی انرژی در بخش کشاورزی، ضرورت مدیریت انرژی در کشور احساس می‌شود، لذا در کار تحقیقاتی حاضر، بهینه‌سازی تیغه‌های مورد استفاده در برش گیاهان علوفه‌ای از طریق تغییر و اصلاح فرم هندسی تیغه برای کاهش انرژی مورد نیار برای برش علوفه مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از روش زیست مقلد یا ***Biomimetic*** (روش چگونگی انتقال راه حل‌های بیولوژیکی به روش مهندسی) استفاده شد. در این تحقیق دو تیغه جدید با الهام از پروفایل هندسی پنجه جلویی آبدزدک و فک ملخ طراحی و ساخته شد. سپس تیغه‌های جدید ساخته شده از نظر انرژی برش با دو تیغه رایج دیگر (تیغه تخت و تیغه خمیده) برای برش ۸ نوع گیاه زراعی و علف هرز مختلف مورد آزمون و مقایسه قرار گرفتند.

1- O'dogherty and Gale
2- Gupta and Oduori
3- Igathinathane
4- Yu
5- Johnson
6- Li
7- Fiazza
8- Raibert

مواد و روش ها

طراحی و ساخت تیغه زیست مقلد آبدزدک

یکی از ویژگی‌های آبدزدک (*mole cricket*) پاهای جلویی قوی (Chapman, 1998) (شکل *a*-1 و b-1) برای بریدن ساقه و ریشه گیاهان و حفر کانال در خاک است که در حقیقت این ویژگی را مدیون طرح هندسی پنجه‌های جلویی خود می‌باشد. در همین راستا ایده اصلی ساخت یکی از تیغه‌ها از طرح هندسی قسمت قیچی مانند پاهای جلویی آبدزدک انتخاب شد. برای این منظور ۵ آبدزدک بالغ از مزرعه‌ای در شهرستان کلات نادری در استان خراسان رضوی گرفته شد. سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه حشره‌شناسی دانشگاه منتقل شدند. برای بررسی پروفایل هندسی پنجه آبدزدک، پنجه‌های جلویی آنها با استفاده از آب مقطر تمیز شده، سپس توسط استریومیکروسکوپ (*Nikon, SMZ-U, Japan*) عکس‌برداری شد.

تصویر عکس‌برداری شده از پای جلوی آبدزدک به نرم‌افزار آنالیز تصویر (*Image J*) منتقل شده و مرز قسمت قیچی مانند پا انتخاب گردید. سپس مرز انتخاب شده به نرم‌افزار *SOLIDWORKS 15* منتقل و نقاط روی منحنی استخراج گردید. نقاط به‌دست آمده در محیط نرم‌افزار *Matlab 2013* ترسیم و بهترین برازش ممکن برای نقاط به‌دست آمد. این نقاط در نرم‌افزار *Matlab* به‌ترتیب با یک تابع فوریه، یک تابع گاوسی و یک تابع چند جمله‌ای تطبیق داده شد. با توجه به پروفایل‌های به‌دست آمده برای پنجه، پروفایل گوسی با بیشترین ضریب همبستگی برای طراحی تیغه انتخاب گردید (شکل ۱-c). در شکل ۱-d نقاط استخراج شده و تابع رسم شده نشان داده شده است؛ سپس برای طراحی تیغه مورد نظر از نقاط a تا b تابع گوسی (شکل ۱-d) استفاده شده و تیغه زیست مقلد آبدزدک در نرم‌افزار *Solidworks* رسم گردید (شکل ۱-e).

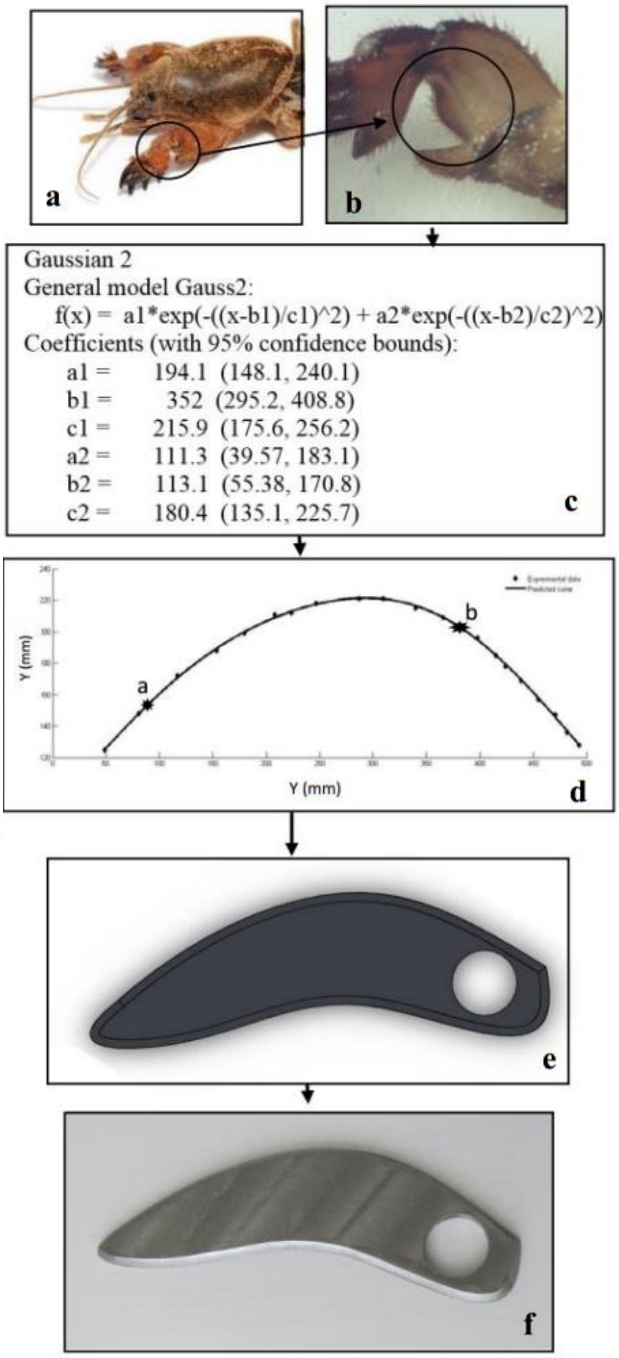
طراحی و ساخت تیغه زیست مقلد ملخ

بارزترین مشخصه ملخ‌ها داشتن آرواره‌های قوی است (Chapman, 1998) و با این آرواره‌های قدرتمند، به راحتی عمل برش گیاهان و ساقه‌ها را انجام می‌دهند. لذا دومین طرح تیغه زیست مقلد از آرواره‌های پایینی ملخ که نقش مهم‌تری از آرواره بالایی در برش دارند انتخاب شد. برای این کار ۵ ملخ بالغ از منطقه کلات نادری واقع در استان خراسان رضوی انتخاب شده و نمونه‌ها به آزمایشگاه حشره‌شناسی منتقل گردید. سپس فک ملخ جدا و اجزای دهانی آن قطعه قطعه شده (شکل ۲-a و ۲-b) و در نهایت از آرواره‌های زیرین فک که نقش اساسی‌تری در بریدن دارند، توسط استریومیکروسکوپ عکس‌برداری گردید. مراحل طراحی همانند طرح آبدزدک انجام شد. نقاط حاصل از منحنی فک ملخ به‌ترتیب با یک تابع نمایی، یک تابع فوریه، یک تابع گاوسی و یک تابع چند جمله‌ای تطبیق داده شد. با توجه به توابع به‌دست آمده تابع گوسی (شکل ۲-c) با بیشترین ضریب همبستگی به‌دست آمده به‌عنوان پروفایل طراحی انتخاب گردید. سپس برای طرح مورد نظر از نقاط a تا b تابع گوسی (شکل ۲-d) استفاده و تیغه زیست مقلد ملخ در نرم‌افزار *Solidworks* رسم شد (شکل ۲-e).

آزمایشات قبلی انجام شده توسط پرسون (۱۹۸۷) برای بررسی تاثیر زاویه تیزی بر روی نیروی برش نشان داد که زاویه تیزی ۳۰ درجه مناسب‌ترین زاویه لبه تیغه برای به حداقل رساندن نیروی برشی تیغه‌ها می‌باشد، لذا در تیغه‌های طراحی شده نیز از همین زاویه برای ساخت تیغه‌ها استفاده گردید. نکته جالب توجه این که دو تیغه مرسوم مورد آزمون نیز دارای همین زاویه تیزی تیغه بودند. همچنین ضخامت لبه تیز تیغه در تمامی تیغه‌ها ۰/۳ میلی‌متر انتخاب شد. بعد از طراحی تیغه در نرم‌افزار *Solidworks* قطعه توسط *CNC* ساخته شد (۱-f و ۲-f).

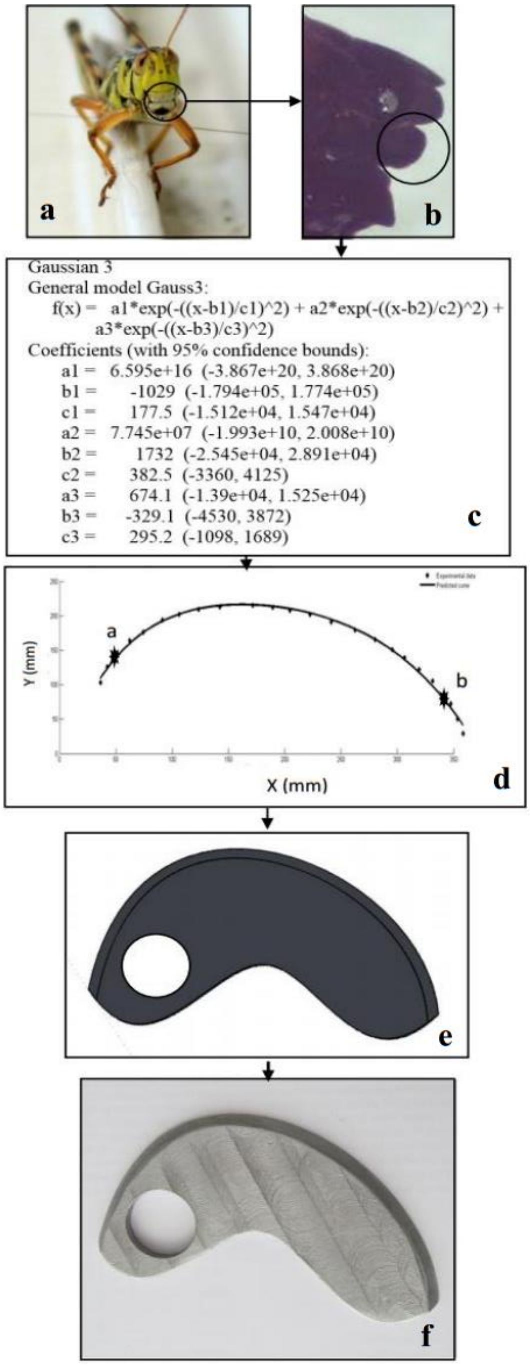
با توجه به شکل ۳، در این تحقیق ۴ تیمار مورد ارزیابی قرار گرفت. تیمار اول تیغه صاف مرسوم، تیمار دوم تیغه خمیده مرسوم، تیمار سوم تیغه زیست مقلد آبدزدک و تیمار چهارم تیغه زیست مقلد ملخ می‌باشد.

طول تیغه‌های مختلف در شکل۴ نشان داده شده است. حداکثر طول تیز تیغه برای تیغه صاف ۴ سانتی‌متر، خمیده ۵/۵ سانتی‌متر، آبدزدک ۸/۵ و ملخ ۴/۶ سانتی‌متر است.



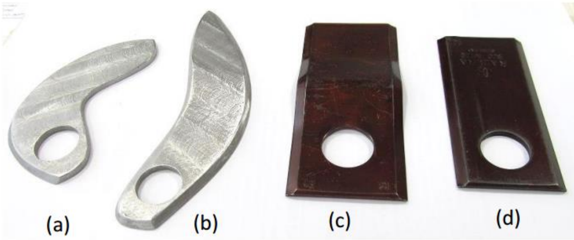
شکل ۱- مراحل ساخت تیغه زیست مقلد آبدزدک

Fig. 1. Construction process of the mole cricket biomimetic blade



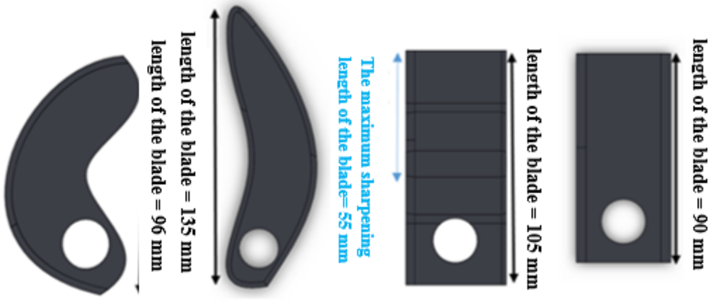
شکل ۲- مراحل ساخت تیغه زیست مقلد ملخ

Fig. 2. Construction process of the grasshopper biomimetic blade.



شکل ۳– تیغه‌های مورد ارزیابی در این تحقیق: (a) زیست مقلد ملخ، (b) زیست مقلد آبدزدک، (c) خمیده و (d) صاف

Fig. 3. The evaluated blades in this study; (a) the grasshopper biomimetic blade, (b) the mole cricket biomimetic blade, (c) the conventional bent blade, (d) the conventional flat blade



شکل ٤– حداکثر طول تیز تیغه

Fig. 4. The maximum sharpening length of the examined blades

خواص فیزیکی ساقه گیاه‌های مورد آزمون

برای انجام آزمایش از پوشش گیاهی موجود در مزرعه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری استفاده شد. گیاهان به دو دسته علوفه هرز و علوفه مفید تقسیم شدند. گیاهان هرز مورد آزمون عبارت بودند از: ارزن وحشی، خرفه، نی، اویار سلام، سلمک، تاج خروس و گیاهانی که برای دام ارزش تغذیه‌ای دارند عبارتند از یونجه و شبدر. برای انجام آزمایش نمونه‌ها از پایین‌ترین سطح ممکن توسط قیچی تیز بریده و ساقه آنها توسط کولیس دیجیتال در دو جهت عمود بر هم اندازه‌گیری شد. برخی از خواص فیزیکی مهم اندازه‌گیری شده در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱– خواص فیزیکی اندازه‌گیری شده ساقه گیاه

Table 1- Some of the important physical properties of plant stem

گیاه **Plant**	نی **Poaceae**	اویارسلام **Nutsedge**	یونجه **Alfalfa**	تاج خروس **Amaranthus**	سلمه **Orach**	خرفه **Purslane**	شالی **Paddy**	شبدر **Clover**
تعداد نمونه Number of samples	42	42	22	37	18	48	49	36
قطر بزرگ Large diameter (mm)	1.77	1.88	1.98	1.68	5.18	6.81	4.67	1.92
قطر کوچک Small diameter (mm)	1.38	1.55	1.88	1.55	5.67	6.46	4.25	1.73
قطر میانگین The mean diameter (mm)	1.57	1.71	1.93	1.62	5.74	6.63	4.46	1.82
واریانس قطر Variance diameter	0.24	0.3	0.22	0.18	0.55	0.69	0.76	0.24
ضریب گردی Round coefficient	0.78	0.83	0.94	0.92	0.97	0.95	0.91	0.9
تعداد نمونه در هر دسته برش Number of stems per category	6	6	4	5	4	4	4	5

رطوبت تمامی نمونه‌ها قبل از شروع آزمایش اندازه‌گیری شد. جهت تعیین رطوبت از استاندارد *ASAE S258.2* استفاده گردید (رابطه ۱). در این استاندارد برای تعیین رطوبت ساقه حرارت ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۲۴ ساعت با نمونه‌هایی به وزن حداقل ۲۵ گرم پیشنهاد شده است.

$$MC=[(W_m-W_d)/W_m]\times 100 \quad (۱)$$

میزان رطوبت هر گیاه مورد آزمون در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- رطوبت اندازه‌گیری شده گیاهان مورد آزمون

Table 2- The amount of moisture content of the examined plants

گیاه **Plant**	نی **Poaceae**	اویارسلام **Nutsedge**	یونجه **Alfalfa**	تاج خروس **Amaranthus**	سلمه **Orach**	خرفه **Purslane**	شالی **Paddy**	شبدر **Clover**
رطوبت **Moisture content**	73.71	76.49	76.48	63.21	75.45	85.14	82.60	74.13

آزمون برش دینامیکی ساقه‌ها

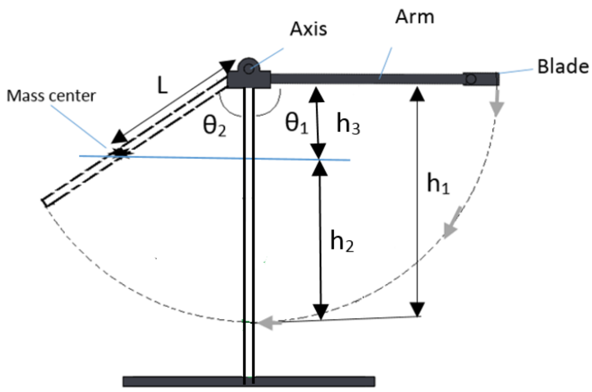
برای انجام آزمایش‌های دینامیکی از یک دستگاه برش پاندولی (شکل ۵) استفاده شد. در این دستگاه با استفاده از شیارهای موجود بر روی فک‌ها و همچنین شاسی دستگاه، فاصله بین فک‌ها و همچنین ارتفاع برش قابل تنظیم بود.



شکل ۵- دستگاه پاندول برشی مورد استفاده

Fig. 5. the pendulum cutting machine

پس از ساخت دستگاه پاندول برشی، تلفات اصطکاکی دستگاه اندازه‌گیری شد. بدین منظور پاندول از زوایای مختلفی رها شده و زوایای برگشت متناسب اندازه‌گیری شد (شکل ۶). بدین صورت که ابتدا زاویه رفت (θ_1) به‌صورت دستی تنظیم و سپس پاندول رها گردید. زاویه برگشت (θ_2) توسط فیلم‌برداری ثبت و فیلم ضبط شده در نرم‌افزار *VideoMatch* تبدیل به تصویر شد تا با بررسی آن حداکثر زاویه برگشت به‌دست آید.



شکل ٦– شماتیک برش و زوایای رفت و برگشت

Fig. 6. Schematic of sweep cutting angles

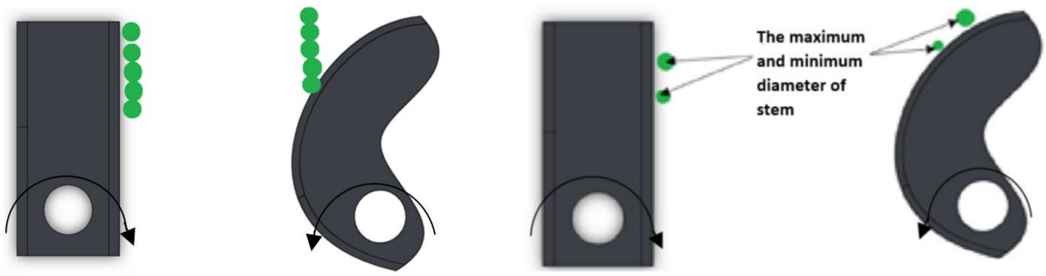
در زاویه برگشت، پاندول به اندازه کافی توقف داشت که بتوان در تصاویر فیلم‌برداری شده زاویه برگشت را با دقت قابل‌قبولی اندازه‌گیری نمود. سپس معادله رگرسیونی زوایای به‌دست آمده با استفاده از روش حداقل مربعات با ضریب تبیین ۰/۹۹ به‌صورت رابطه (۲) به‌دست آمد.

$$\theta'_2 = 1.035\ \theta'_1 - 4.57 \quad (۲)$$

در این رابطه، θ'_2 زاویه برگشت بازو در حالت بدون برش و θ'_1 زاویه رفت بازوی شناور در حالت بدون برش می‌باشد (برای نمایش زوایای رفت و برگشت در حالت برش از نمادهای بدون پریم استفاده می‌شود). به‌طور معمول برای تخمین تلفات اصطکاکی رابطه یا فرمول پیش‌بینی‌کننده خاصی وجود ندارد، لذا تلفات اصطکاکی به‌صورت تجربی اندازه‌گیری شد. برای این کار بدون وجود ساقه‌های برش، پاندول از ارتفاع‌های متفاوتی رها شده و زاویه برگشت اندازه‌گیری شد. از اندازه‌گیری اختلاف بین زاویه رفت و برگشت در حالت بدون برش، مقدار تلفات اصطکاکی دستگاه به‌دست آمد (رابطه ۳) .

$$\Delta E_{lost} = MgL(\cos\theta'_2 - \cos\theta'_1) \quad (۳)$$

در مرحله بعدی تعدادی پیش آزمون انجام شد تا بتوان زاویه‌ای از پاندول که همه ساقه‌های مورد آزمون را به‌راحتی برش دهد، انتخاب گردد. برای این کار قطر ساقه‌ها به دو دسته "ساقه‌های باریک با قطر کمتر از ۲ میلی‌متر" شامل نی، اویار سلام، یونجه، تاج خروس و شبدر و "ساقه‌های ضخیم با قطر بیشتر از ۴ میلی‌متر" شامل سلمه، خرفه و شالی تقسیم‌بندی شد. برای انجام برش از روش "برش دسته‌ای" استفاده شد، بدین صورت که آزمون برش به‌جای فقط یک ساقه، دسته ۴ تا ۶ تایی از ساقه‌ها را برش می‌داد. به سه دلیل ساقه‌ها به روش دسته‌ای مورد برش قرار گرفتند. از آن جایی که قطر ساقه‌ها نسبت به طول تیز شده تیغه کم است (حداقل قطر ۱/۵۷ میلی‌متر و حداکثر قطر ساقه ۶/۶۳ میلی‌متر)، لذا با برش فقط یک ساقه نمی‌توان به‌درستی تغییرات انرژی بین تیمارها را به شکل هندسی تیغه نسبت داد (شکل ۷). دوم این که با برش دسته‌ای دقت آزمون افزایش می‌یابد. انرژی لازم برای برش فقط یک ساقه ممکن است آن قدر کم باشد که خطای اندازه‌گیری زاویه برگشت در دقت آزمون تاثیر منفی بگذارد ولی با برش دسته‌ای خطای محاسبات کاهش خواهد یافت. سوم این که در شرایط واقعی مزرعه برش تک ساقه‌ای اتفاق نمی‌افتد و با توجه به سرعت دورانی بالای دروگر، در هر لحظه مجموعه‌ای از ساقه‌ها بریده می‌شود و می‌توان گفت به جای برش نقطه‌ای، خط برش اتفاق می‌افتد. در شکل ۷ شماتیکی از اندازه طول تیغه و هندسه تیغه نسبت به قطر ساقه نشان داده شده است.



شکل ۷– شماتیکی از اندازه طول تیغه و هندسه تیغه نسبت به قطر ساقه

Fig. 7. Schematic of the blade length and geometry in proportion to the stem diameter

با توجه به موارد ذکر شده، برای ساقه‌های باریک از دسته‌های ۴ تا ۶ تایی (بسته به سفتی و مقاومت برشی ساقه) و برای ساقه‌های ضخیم از دسته‌های ۴ تایی برای برش استفاده شد (جدول ۱). مطابق نتایج حاصل از آزمون و خطا، زاویه θ_1=93 درجه برای دسته ساقه‌های باریک و زاویه θ_1=143 درجه برای دسته ساقه‌های ضخیم انتخاب گردید (شکل ۶). زوایای انتخاب شده، زوایایی بودند که به‌راحتی همه دسته ساقه‌ها را برش داده و در ساقه‌های برش‌یافته حالت "ریش –ریش" یا برش ناقص مشاهده نگردید. از طرف دیگر در زوایای انتخابی، زاویه برگشت به اندازه کافی بزرگ بود که بتوان اختلاف انرژی رفت و برگشت را محاسبه نمود.

در مرحله بعدی، دستگاه ساخته شده به موقعیت گیاهان مورد آزمون واقع در مزرعه منتقل شد. ابتدا ساقه‌ها از محل اتصال ساقه با زمین برش داده شده، سپس برای انجام آزمون برش به‌صورت افقی بر روی فک ثابت دستگاه قرار گرفتند. فاصله افقی بین فک‌های ثابت قابل تنظیم بوده و دستگاه دارای سوراخ‌های متعدد با قطرهای متفاوت بود تا برش ساقه‌های با قطر مختلف و برش دسته‌ای به سادگی قابل انجام باشد.

اندازه‌گیری انرژی برش

انرژی لازم برای برش ساقه‌ها به‌وسیله تیغه‌های متفاوت با توجه به اختلاف بین زاویه‌های θ_2 و θ_1 در طول برش ساقه‌ها تعیین گردید. به طوری که برای همه تیغه‌های مورد آزمون، زاویه اولیه θ_1 برابر بوده ولی با توجه به نوع تیغه و نوع گیاه مورد برش، در هر برش θ_2 متفاوتی به‌دست آمد که نشان‌دهنده انرژی برشی متفاوت برای هر یک از تیغه‌های مورد آزمون است. بنابر قوانین دینامیکی داریم: "تغییر در انرژی جنبشی سیستم = کار نیروهای خارجی". از طرف دیگر کار نیروهای خارجی از تجمیع کار نیروی وزن، کار نیروی برش و کار نیروی اصطکاک حاصل می‌شود. اگر کار نیروی برش را با $W_{1\text{-}2}$، کار نیروی وزن را با $MgL(\cos\theta_2 - \cos\theta_1)$ و کار نیروی اصطکاک را با ΔE_{lost} نشان دهیم، همچنین با توجه به این نکته که در جابه‌جایی نشان داده شده در شکل ۶ کار نیروهای برش و اصطکاک منفی و کار نیروی وزن مثبت است، به علاوه تغییر در انرژی جنبشی در جابه‌جایی مورد بحث صفر می‌باشد، رابطه کار– انرژی به شکل زیر در می‌آید:

$$W_{1\text{-}2} = MgL(\cos\theta_2 - \cos\theta_1) - \Delta E_{lost} \quad (۴)$$

با توجه به شکل ۶ و رابطه (۴) داریم:

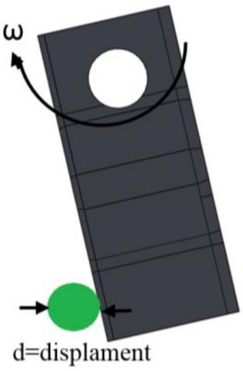
$$W_{1\text{-}2} = Mg(L\cos\theta_2 - L\cos\theta_1) - \Delta E_{lost} = Mg(h_1 - h_2) - \Delta E_{lost}$$

از طرف دیگر چون کار نیروی برشی برابر است با $NF_\tau d$ و $F_\tau=\tau A$ در نتیجه داریم:

$$W_{1\text{-}2} = N\tau Ad \quad (۵)$$

که در این رابطه N تعداد ساقه در هر دسته، A سطح مقطع برش ساقه و d میزان جابه‌جایی تیغه در زمان برش می‌باشد. در نهایت با برابر قرار دادن دو رابطه محاسباتی برای $W_{1\text{-}2}$ خواهیم داشت:

$$\tau = \frac{Mg(h_1 - h_2) - \Delta E_{lost}}{N \cdot A \cdot d} \quad (۶)$$



شکل ۸– فاصله جابه‌جایی در زمان برش

Fig. 8. Displacement during cutting

برای راستی‌آزمایی و بررسی صحت آزمون‌ها، ابتدا تیغه صاف بر روی دستگاه نصب شده، سپس تنش برشی ساقه یونجه به‌عنوان تیمار شاهد اندازه‌گیری گردید. سپس داده‌های به‌دست آمده با مشاهدات تجربی انجام گرفته توسط نظری‌گله دار (۲۰۰۸) مقایسه شد. نظری گله دار و همکاران (۲۰۰۸) با بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی ساقه یونجه رابطه (۷) را برای تعیین تنش برشی ساقه یونجه معرفی کردند:

$$\tau s = 10.123\exp(0.0128MC) \quad (۷)$$

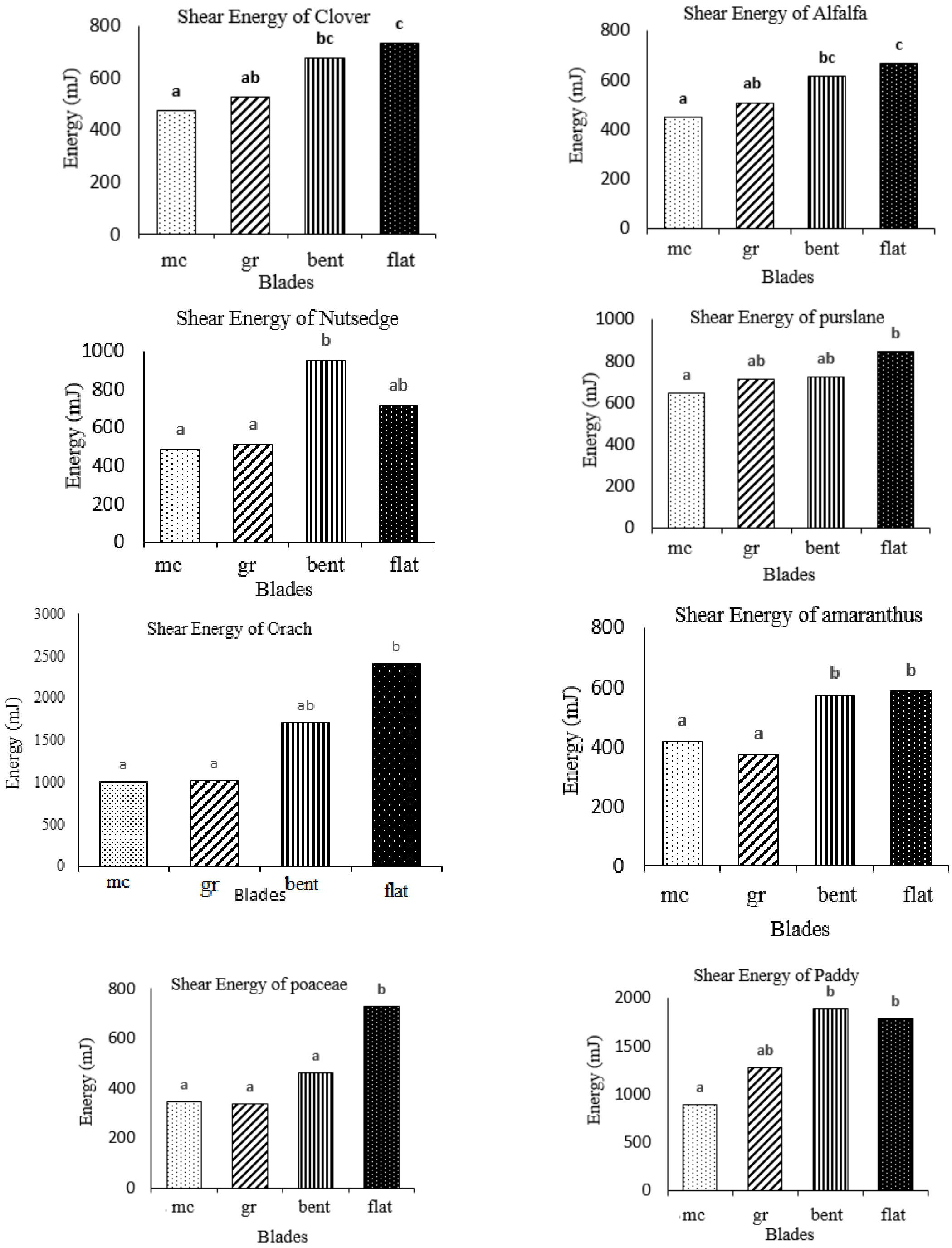
که در این رابطه MC رطوبت محصول است.

برای رطوبت ۷۵/۴۵ درصد که آزمایش یونجه در این رطوبت انجام شد، میزان تنش برشی به‌دست آمده از رابطه (۷) برابر ۲۸/۹۸ مگاپاسکال به‌دست آمد و تنش برشی منتجه از رابطه نظری و همکاران در این رطوبت ۲۶/۴۴ مگاپاسکال به‌دست آمد. بنابراین اختلاف بین نتیجه آزمون برای برش یونجه با تیغه صاف و رابطه ارائه شده توسط نظری و همکاران برابر با ۸/۷۶٪ به‌دست آمد، که تأییدکننده صحت روش تئوری تحلیل مکانیزم برش ساقه علوفه می‌باشد.

در نهایت نتایج حاصل از آزمایش انرژی برش در نرم‌افزار *SPSS 22* مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون توکی استفاده شد.

نتایج و بحث

در شکل ۹ انرژی برشی مورد نیاز برای برش دسته گیاهان مورد آزمون نشان داده شده است. میزان انرژی مورد نیاز برش برای تیمارها (چهار فرم هندسی تیغه‌ها) در گیاهان مختلف با استفاده از رابطه (۴) به‌دست آمد. برای نتایج نشان داده شده در این شکل، از آزمون یک راهه آنووا (*ONE-WAY ANOVA*) و از روش توکی برای مقایسه دو به دوی میانگین‌ها استفاده شد.



شکل ۹– میزان انرژی برش برای گیاهان مختلف

Fig. 9. The total energy required for cutting different plants; "m.c" and "gr" stand for mole cricket and grasshopper biomimetic blades, respectively.

در همه تیمارها، با توجه به نتیجه آزمون توکی در سطح ۵٪، اختلاف معنی‌داری بین تیغه‌های زیست مقلد طراحی شده و تیغه‌های رایج صاف و خمیده مشاهده گردید که این اختلاف با حروف کوچک بالای هر ستون در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در شکل ۹ نشان می‌دهد که برای برش تمام تیمارهای مورد آزمون بین تیغه‌های آبدزدک و ملخ در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. همچنین با توجه نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، بین تیغه ملخ با تیغه صاف در برش یونجه، شبدر، تاج خروس، سلمک و نی و بین تیغه‌های ملخ با تیغه خمیده در برش یونجه، شبدر، اویار سلام و تاج خروس و بین تیغه‌های آبدزدک با تیغه صاف در برش یونجه، شبدر، خرفه تاج خروس، سلمک، شالی و نی و بین تیغه آبدزدک با خمیده در برش یونجه، شبدر، اویار سلام، تاج خروس و شالی اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ به‌دست آمد. در همین راستا بین تیغه صاف و تیغه خمیده برای همه عوامل برش (به جز گیاه نی) اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ مشاهده نشد.

در آزمون برش انجام گرفته، میانگین قطر ساقه‌های مورد آزمون و سطح مقطع برش آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. برای برش ساقه‌های نرم با تنش برشی کم از دسته‌های ۶ تایی و برای برش ساقه‌های ضخیم‌تر با تنش برشی زیاد از دسته‌های ۴ تایی استفاده شد. میزان انرژی برشی مورد نیاز دسته‌های ۴ و ۶ تایی برای انواع مختلف ساقه‌ها و تیغه‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. طبق نتایج تحقیق حاضر، اختلاف معنی‌داری در انرژی برشی تیغه‌های زیست مقلد ساخته شده در تمامی تیمارها نسبت به تیغه‌های مرسوم (صاف و خمیده) مشاهده شد. تیغه زیست مقلد آبدزدک، به‌طور متوسط ۳۹/۱۳ درصد انرژی برش را نسبت به تیغه صاف و ۳۲/۸ درصد نسبت به تیغه خمیده کاهش داد. دلیل اصلی کاهش انرژی برشی مورد نیاز در تیغه‌های جدید، فرم هندسی سطح برش تیغه‌های زیست مقلد طراحی شده می‌باشد. در تیغه‌های جدید، تیغه به‌تدریج با ساقه‌ها درگیر شده و به‌صورت مورب و تدریجی عمل برش را انجام می‌دهد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که فرم هندسی پنجه آبدزدک عملکرد بهتری نسبت به فرم هندسی فک ملخ دارد. این موضوع نشان‌دهنده این است که به غیر از برش تدریجی ساقه که در هر دو تیغه زیست مقلد وجود دارد، فرم هندسی لبه برش تیغه نیز اهمیت دارد. چرا که به‌عنوان مثال، تیغه آبدزدک نسبت به تیغه خمیده انرژی برش مورد نیاز ساقه یونجه را ۲۷.۰۵ درصد کاهش داده، در صورتی که این عدد برای تیغه فک ملخ ۱۷.۹۸ درصد بوده است.

جدول ۳- انرژی برشی مورد نیاز عوامل مورد آزمون

Table 3- The shear energy required for the examined batches for different types of stems and blade

گیاه Plant	The shear energy of stem (mJ)					C.V
	سطح مقطع برش The cross section of stem (mm^2)	تیغه صاف Flat blade	تیغه خمیده Bent blade	تیغه ملخ Grasshopper biomimetic blade	تیغه آبدزدک Mole cricket biomimetic blade	
Alfalfa	2.97±0.69	664.60±91.60	614.56±91.46	503.62±66.64	447.90±70.96	19.35
Purslane	33.96±7.93	844.74±79.97	723.79±91.56	711.37±112.71	647.30±64.76	14.29
Poaceae	1.97±0.63	727.71±138.71	460.71±182.63	336.4±31.99	345.89±124.65	43.75
Nutsedge	2.35±0.84	714.41±233.95	953.34±225.68	511.81±156.06	486.57±34.94	38.68
Orach	26.13±5.10	2410±517.74	1700±612.387	1013.91±316.68	1002.21±276.28	53.51
Clover	2.65±0.68	733.95±149.96	667.35±56.77	524.81±53.32	473.69±115.97	20.25
Paddy	16.05±5.56	1784±533.33	1880.81±176.43	1277.44±171.15	893.73±110.32	31.43
Amaranthus	2.08±0.48	586.28±84.50	575.65±100.58	371.57±53.50	416.34±35	25.18

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که شکل هندسی تیغه تاثیر مهمی بر میزان انرژی برشی گیاهان دارد. به طوری‌که تیغه زیست مقلد آبدزدک مقدار انرژی برش را نسبت به تیغه صاف بین ۲۳/۳۷ تا ۵۲/۵۱ درصد (با میانگین ۳۹/۱۳ درصد) و نسبت به تیغه خمیده بین ۱۰/۴۶ تا ۵۲/۴۶ (با میانگین ۳۲/۸ درصد) کاهش داد. به همین ترتیب تیغه زیست مقلد ملخ مقدار انرژی برش را نسبت به تیغه صاف ۱۵/۷۸ تا ۵۳/۸۲ درصد (با میانگین ۳۳/۵۹ درصد) و نسبت به تیغه خمیده ۲ تا ۴۶/۲۹ درصد (با میانگین ۲۷/۸۷ درصد) کاهش داد. لذا با توجه به نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، تیغه زیست مقلد آبدزدک عملکرد بهتری را نسبت به تیغه زیست مقلد ملخ در برش گیاهان نشان داده و به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی، برای ساخت تیغه‌های برش گیاهان توصیه می‌گردد. به‌عنوان خلاصه عملکرد تیغه‌ها، درصد کاهش انرژی مصرفی تیغه‌های زیست مقلد آبدزدک و ملخ نسبت به تیغه‌های صاف و خمیده در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ٤- درصد کاهش انرژی تیغه زیست مقلد آبدزدک و ملخ نسبت به تیغه صاف

Table 4- The performance of the blades, the decreased energy percentage of the mole cricket and grasshopper biomimetic blades in compare to the flat blade

گیاه **Plant**	یونجه Alfalfa	شبدر Clover	خرفه Purslane	اویار سلام Nutsedge	تاج خروس Amaranthus	سلمک Orach	نی Poaceae	شالی Paddy
کاهش انرژی برش تیغه آبدزدک نسبت به تیغه صاف (٪) The decreased energy percentage of the mole cricket biomimetic blades in compare to the flat blade (٪)	32.68	35.46	23.37	31.89	29.08	58.14	52.51	49.90
کاهش انرژی برش تیغه ملخ نسبت به تیغه صاف (٪) The decreased energy percentage of the grasshopper biomimetic blades in compare to the flat blade (٪)	24.24	28.49	15.78	28.35	36.74	52.92	53.82	28.39
کاهش انرژی برش تیغه آبدزدک نسبت به تیغه خمیده (٪) The decreased energy percentage of the mole cricket biomimetic blades in compare to the bent blade (٪)	27.05	30.03	10.47	48.96	27.59	41.05	24.81	52.46
کاهش انرژی برش تیغه ملخ نسبت به تیغه خمیده (٪) The decreased energy percentage of the grasshopper biomimetic blades in compare to the bent blade (٪)	17.98	22.48	1.61	46.29	35.38	40.30	26.87	32.05

References

1. ASABE Standards. 2008. S358.2. Moisture measurement eforages. St. Joseph, Mich.: ASABE.
2. Azadbakht, M., E. Esmaeilzadeh, and M. Esmaeili-Shayan. 2015. Energy consumption during impact cutting of canola stalk as a function of moisture content and cutting height. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences 14 (2): 147-152.
3. Chancellor, W. J. 1987. Cutting biological materials. Agr Eng. Hand book. CRC Press Inc.
4. Chattopadhyay, P., and K. Pandey. 1999. Effect of knife and operational parameters on energy requirement in flail forage harvesting. Journal of Agricultural Engineering Research 73: 3-12.
5. Chapman, R. F. 1998. The insects: structure and function. Cambridge university press.
6. Chen, Y., J. L. Gratton, and J. Liu. 2004. Power requirements of hemp cutting and conditioning. Biosystems Engineering 87: 417-424.
7. Dehghan-Hesar, H., and D. Kalantari. 2016. Design a biomimetic disc using geometric features of the claws. AgricEngInt: CIGR Journal 18 (1): 103-109.
8. Dowgiallo, A. 2005. Cutting force of fibrous materials. Journal of Food Engineering 66: 57-61.
9. Fiazza, C., T. Salumäe, M. Listak, G. Kulikovskis, R. Templeton, O. Akanyeti, W. Megill, P. Fiorini, and M. Kruusmaa. 2010. Biomimetic mechanical design for soft-bodied underwater vehicles. Pages 1-7. OCEANS 2010 IEEE-Sydney: IEEE.
10. Galedar, M. N., A. Jafari, S. Mohtasebi, A. Tabatabaeefar, A. Sharifi, M. O'Dogherty, Sh. Rafiee, and G. Richard. 2008. Effects of moisture content and level in the crop on the engineering properties of alfalfa stems. Biosystems Engineering 101: 199-208.
11. Ghahraei, O., D. Ahmad, A. Khalina, H. Suryanto, and J. Othman. 2011. Cutting tests of kenaf stems. Transactions of the ASABE 54: 51-56.
12. Gupta, C., and M. Oduori. 1992. Design of the revolving knife-type sugarcane basecutter. Transactions of the ASAE 35: 1747-1752.
13. Igathinathane, C., A. Womac, and S. Sokhansanj. 2010. Corn stalk orientation effect on mechanical cutting. Biosystems Engineering 107: 97-106.
14. Igathinathane, C., A. Womac, S. Sokhansanj, and S. Narayan. 2009. Size reduction of high-and low-moisture corn stalks by linear knife grid system. Biomass and Bioenergy 33: 547-557.
15. Igathinathane, C., L. Pordesimo, M. Schilling, and E. Columbus. 2011. Fast and simple measurement of cutting energy requirement of plant stalk and prediction model development. Industrial Crops and Products 33: 518-523.
16. Ince, A., S. Uğurluay, E. Güzel, and M. Özcan. 2005. Bending and shearing characteristics of sunflower stalk residue. Biosystems Engineering 92: 175-181.
17. Johnson, P. C., C. L. Clementson, S. K. Mathanker, T. E. Grift, and A. C. Hansen. 2012. Cutting energy characteristics of Miscanthus x giganteus stems with varying oblique angle and cutting speed. Biosystems Engineering 112: 42-48.
18. Kaack, K., and K.-U. Schwarz. 2001. Morphological and mechanical properties of Miscanthus in relation to harvesting, lodging, and growth conditions. Industrial Crops and Products 14: 145-154.
19. Kamgar. S., F. Noori Gushki, and H. Mustafavand. 2016. Field evaluation of cutter and feeder mechanism of chickpea harvester for lentil harvesting. Journal of Agricultural Machinery 6 (2): 396-405. (In Farsi).

20. Khazaei, J., H. Rabani, A. Ebadi, and F. Golbabaei. 2002. Determining the shear strength and picking force of pyrethrum flower. AIC Paper 2: 221.
21. Li, M., D. Chen, S. Zhang, and J. Tong. 2013. Biomimeitc design of a stubble-cutting disc using finite element analysis. Journal of Bionic Engineering 10: 118-127.
22. Maharlooei. M. M., M. Loghavi, and S. M. Nasiri. 2014. Developing an in-field yield monitoring system and predicting some nutritional quality properties of Alfalfa using shear and compressive energy. Journal of Agricultural Machinery 4 (2): 184-1935. (In Farsi).
23. Mathanker, S. K., T. E. Grift, and A. C. Hansen. 2015. Effect of blade oblique angle and cutting speed on cutting energy for energycane stems. Biosystems Engineering 133: 64-70.
24. Maughan, J. D., S. K. Mathanker, T. E. Grift, and A. C. Hansen. 2013. Impact of blade angle on miscanthus harvesting energy requirement. Pages 1. 2013 Kansas City, Missouri, July 21-July 24, 2013: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
25. McRandal, D., and P. McNulty. 1978. Impact cutting behaviour of forage crops I. Mathematical models and laboratory tests. Journal of Agricultural Engineering Research 23: 313-328.
26. Mekonnen, D. K., E. Bryan, T. Alemu, and C. Ringler. 2017. Food versus fuel: Examining tradeoffs in the allocation of biomass energy sources to domestic and productive uses in Ethiopia. Agricultural Economics 48 (4): 425-435.
27. Naghipour zadeh mahani, M., and M. H. Aghkhani. 2016. The effect of slicing type on drying kinetics and quality of dried carrot. Journal of Agricultural Machinery 6 (1): 224-235. (In Farsi).
28. O'dogherty, M., and G. Gale. 1991. Laboratory studies of the dynamic behaviour of grass, straw and polystyrene tube during high-speed cutting. Journal of Agricultural Engineering Research 49: 33-57.
29. Persson, S. 1987. Mechanics of cutting plant material. American society of agricultural engineers. St. Joseph, Michigan, USA.
30. Raibert, M., K. Blankespoor, G. Nelson, and R. Playter. 2008. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. IFAC Proceedings Volumes 41: 10822-10825.
31. Sitkei, G. 1987. Mechanics of agricultural materials. Elsevier.
32. Srivastava, A. K., C. E. Goering, R. P. Rohrbach, and D. R. Buckmaster. 1993. Engineering principles of agricultural machines. American society of agricultural engineers St. Joseph, Mich. Report no.
33. Taghijarah, H., H. Ahmadi, M. Ghahderijani, and M. Tavakoli. 2011. Shearing Characteristics of Sugar Cane (*Saccharum officinarum* L.) Stalks as a Function of the Rate of the Applied Force. Australian Journal of Crop Science 5: 630.
34. Womac, A., M. Yu, C. Igathinathane, P. Ye, D. Hayes, S. Narayan, S. Sokhansanj, and L. Wright. 2005. Shearing Characteristics of Biomass for Size Reduction. 2005 ASAE Ann. Pages 07. Int. Meeting.
35. Yu, M., A. Womac, C. Igathinathane, P. Ayers, and M. Buschermohle. 2006. Switchgrass ultimate stresses at typical biomass conditions available for processing. Biomass and Bioenergy 30: 214-219.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 9, No. 2, Fall - Winter 2019, p. 265-278

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۹، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۸، ص ۲۷۸-۲۶۵

Design and Evaluation of Two New Biomimetic Blades for Reducing the Shear Energy Required for Cutting Herbal Plants

H. Dehghan-Hesar[1]- D. Kalantari[2*]

Received: 01-01-2018
Accepted: 26-06-2018

Introduction

Optimizing the energy consumption in mechanized agriculture is becoming more important due to the limited energy sources in the world. In this regard, optimization of the cutting blades is presented in this study by modifying the geometric form of the blade to reduce the forage cutting energy. Hence, two new blades, inspired by the geometric profiles of front claws of mole crickets and teeth of grasshoppers were designed and built using the biomimetic method (the method for transferring biological solutions to the engineering ones). Finally, the new biomimetic blades were tested and compared with two other conventional blades (flat and bent blades) by cutting 8 different types of crops and weeds.

Materials and Methods

The main idea of building one of the blades was inspired by the geometric forms of mole crickets' scissors-like front legs and lower teeth of grasshoppers. Therefore, five adult mole crickets and five grasshoppers were collected from a farm in Kalat-e Naderi, Khorasan Razavi Province. In the next step, different images were captured from the front leg of mole cricket and tooth of grasshopper using the stereomicroscope (Nikon, SMZ-U, Japan). In the next step, the images were transferred to the image analysis software (Image J) and the boundary lines of images were selected. Then, the selected boundary lines were imported to SolidWorks software and the points on the selected curve were extracted. The obtained points were drawn in Matlab software and several fitting curves for the points were examined, e.g., Fourier function, Gaussian function, and polynomial function. According to the obtained results, the Gaussian profile was selected to design the blade with the highest correlation coefficient (R^2=0.99), see Fig. 1d. To design the desired blade, a section of the Gaussian curve between points A and B were used. Finally, the biomimetic blade of the mole cricket and grasshopper were drawn in SolidWorks software (Fig. 1e). After designing the blades in the SolidWorks software, the biomimetic blades were built by a CNC machine.

Results and Discussion

In all the treatments, a significant difference was observed between the biomimetic blades and the conventional flat and bent blades according to the results of Tukey's test at the level of 5%. The obtained results showed that there was no significant difference between the mole cricket and grasshopper blades at the level of 5% for cutting. According to the results obtained in this study, there was a significant difference at the level of 5% between the grasshopper and flat blades for cutting alfalfa, clover, amaranth, orach, and poaceae; as well as between the grasshopper and bent blades for cutting alfalfa, clover, nutsedge, and amaranth, also between mole cricket and flat blades for cutting alfalfa, clover, purslane, amaranth, orach, paddy, and poaceae and finally between mole cricket and flat blades in cutting alfalfa, clover, nutsedge, amaranthus, and paddy. In this regard, no significant difference at the level of 5% was observed between the flat and bent blades for all cutting treatment. The batches containing 6 stems were used for cutting the soft stems with low shear stress and the batches containing 4 stems were used for cutting thick stems with high shear stress.

Conclusions

The results obtained in this study indicated that the geometrical form of the blade has a significant influence on the amount of required shear energy. The mole cricket biomimetic blade reduced the cutting energy compared to the flat blade by 23.37% to 52.51% (with the mean of 39.11%) and compared to the bent blade by 10.46% to 52.46% (with the mean of 32.8%). The grasshopper biomimetic blade also reduced the cutting energy compared to the flat blade by 15.78% to 53.82% (with the mean of 33.59%) and compared to the bent blade by 2% to 46.29% (with the mean of 27.87%). According to the results of this study, the mole cricket biomimetic blade

1 and 2- MSc Graduate and Associate Professor, Respectively, Dep. of Mechanics of Biosystems Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU)
(*- Corresponding Author Email: dkalantari2000@yahoo.com)

showed better performance in comparison with the grasshopper biomimetic blade for cutting the plants and as a final result could be recommended to build the plant cutting blades.

Keywords: Biomimetic, Energy, Grasshopper, Mole cricket, Mower blade